



TITLE:

電磁鋼板の磁化機構に関するマルチフィジックスモデルの開発(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

伊藤, 俊平

CITATION:

伊藤, 俊平. 電磁鋼板の磁化機構に関するマルチフィジックスモデルの開発. 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20376>

RIGHT:

(続紙 1)

京都大学	博士 (工学)	氏名	伊藤 俊平
論文題目	電磁鋼板の磁化機構に関するマルチフィジックスモデルの開発		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、電気機器に用いられる主要な鉄心材料である電磁鋼板を対象として、磁区構造を形成するエネルギーの極小化に基づいて磁化機構を記述する磁気-機械連成のマルチフィジックスモデルを開発し、電磁鋼板の磁化および磁歪の解析を行って計測結果と比較した結果をまとめたものであり、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の研究背景として、電磁鋼板などの鉄心材料のモデル化手法の現状について述べ、マクロスケールにおける物理的なモデル化手法の必要性和、電磁鋼板の磁気特性に対する応力の影響の重要性を示すことで、本論文の目的である、機械的応力を考慮したマルチフィジックスモデルの研究開発の必要性を述べている。</p> <p>第2章では、モデル化の対象である電磁鋼板の磁気特性の測定方法について述べている。まず、歪みゲージを用いた磁歪計測の機能を新たに加えた測定装置を構築している。次に、現状のベクトル磁気測定装置の問題点を指摘し、鋼板試料とシールド鋼板の間隔を小さくし、磁束密度の検出コイル幅を大きくすることで測定精度が改善することを示している。</p> <p>第3章では、まず、磁性材料のモデル化手法である集合磁区モデルについて述べ、エネルギー極小化に基づく磁化機構表現の方法を説明している。計測結果との比較により、同モデルによる電磁鋼板の磁化特性表現が不十分であることを示している。また、電磁鋼板に加わる応力の影響を考慮するために、新たに磁気弾性エネルギーの項を同モデルに付加する手法を開発している。現状のモデルでは、磁化特性の応力依存性の表現が不十分であることを計測結果との比較により示すとともに、その理由として90°磁壁移動の表現に不備があることをエネルギー的な観点から明らかにしている。</p> <p>第4章では、集合磁区モデルによる磁歪の算出方法を述べた後、前章で見出された問題点の解消法として、6磁区の単位セルを持つ集合磁区モデルを提案している。この手法は、電磁鋼板の立方磁気異方性に基づくものであり、現実的な90°磁壁移動を含む磁化過程を表現可能にする。その結果、提案モデルは、方向性電磁鋼板の実測に近い磁化特性を再現できることを示しており、ランセット磁区を表現することも可能である。また、前章で提案した磁気弾性エネルギーの導入により、提案モデルが、無方向性電磁鋼板における圧縮応力による磁化特性の劣化を精度よく予測できることを示しており、劣化の原因が磁区構造の変化によるものであることを明らかにしている。さらに、開発モデルにより、平均磁化ベクトルを既知として磁化特性を算出する手法を提案し、方向性電磁鋼板における、各方向の交番磁化特性および回転磁化特性について計測結果とよく一致する計算結果を得ており、方向に依存した磁歪特性についても良好な再現結果を得ている。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	伊藤 俊平
<p>第5章では、磁歪に由来する内部応力の分布を考慮する方法を開発し、前述のマルチフィジックスモデルに組み込む手法を提案している。磁性材料内の歪は、磁歪と機械的応力による弾性歪の成分に分けられる。歪の各成分と応力のそれぞれの局所量と平均量の差の間の関係から、局所的な応力と外部応力に由来する平均応力との関係を求め、各セルにおける磁歪との相互作用による磁気弾性エネルギーを算出することにより内部応力の分布を考慮している。その結果、一様な内部応力分布を仮定する場合と比較して、圧縮応力による透磁率の低下をより正確に予測できることを示している。</p> <p>第6章では、鉄損の主要因であるヒステリシス現象が磁壁のピンニングに起因することに基づき、ピンニングサイトの統計的な分布を仮定することにより、ピンニング機構を表現する方法を提案し、マルチフィジックスモデルに組み込む手法を開発している。まず、ピンニング磁界をストップヒステロンを用いて表現し、ピンニングサイトの密度関数からストップヒステロンの分布関数を導く手法を開発している。次に、ピンニング磁界を、セル内の磁化ベクトルに基づいて与える手法と、セル内の磁壁移動に基づいて与える手法を提案するとともに、磁化曲線の実測結果からピンニングサイトの分布関数を推測する方法を開発している。計測結果との比較により、磁壁移動に基づいてピンニング磁界を算出する方法により、外部からの圧縮応力によるヒステリシス損失の増加量を予測できることを示している。また、電磁鋼板の保磁力データからピンニングサイトの密度関数を推測する手法を示し、各種無方向性電磁鋼板のヒステリシス特性の予測に有効であることを示している。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、磁気弾性エネルギーを含めたエネルギーの極小化の原理に基づいて電磁鋼板の磁化機構を記述することで、電磁鋼板のマクロスケールの磁気的特性を表現する磁気-機械連成のマルチフィジックスモデルを開発し、計測結果との比較により同モデルの検証を行った結果をまとめたものであり、得られた主要な結果は以下の通りである。

1. 電磁鋼板の立方磁気異方性に基づいて、6磁区の単位セルを持つ集合磁区モデルを提案した。これに、磁気弾性エネルギーを取り入れることにより、外部からの機械的応力が電磁鋼板の磁化特性に及ぼす影響を評価できるマルチフィジックスモデルを開発した。開発モデルは、材料の磁化曲線の測定結果を用いずに、磁気異方性定数や磁歪定数などの磁气的・機械的な材料定数から材料の磁気特性とその応力依存性を予測する物理的モデルであることを特徴とする。計測結果との比較により、鋼板に印加された圧縮応力が磁化特性に及ぼす影響を提案モデルによって予測可能であることを示した。

2. 前述のマルチフィジックスモデルにより、回転磁束下における磁化特性を算出する手法を開発し、回転磁化特性および磁歪特性について計測結果とよく一致する計算結果を得た。

3. マルチフィジックスモデルにおいて、外部の機械的応力と内部の磁歪の相互作用に由来する応力の局所的な分布の影響を考慮する方法を開発した。一様な内部応力分布を仮定する場合と比較して、圧縮応力による透磁率の低下をより正確に予測できることを示すとともに、応力によって変化する材料内部の磁化過程を明らかにした。

4. ピンニングサイトの統計的な分布を仮定することで、ピンニング機構をマルチフィジックスモデルに組み込む手法を開発した。無応力下における磁化特性からピンニングサイトの密度関数を推定することにより、圧縮応力によるヒステリシス損の増加を予測可能であることを測定結果との比較により示した。

上記のように、本論文は、磁気-機械連成のマルチフィジックスモデルを開発することにより、電気機器の鉄心材料である電磁鋼板における磁気特性の応力依存性を解明することに成功したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成29年1月25日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。